

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Тумарченко Лариси Олександрівни
на тему «Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для
ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 13 Механічна інженерія
за спеціальністю 131 Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації.

Дисертація Л. О. Тумарченко присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми оптимізації процесу виготовлення анатомічних моделей методом пошарового наплавлення (FDM) для потреб ортопедичної хірургії з урахуванням клінічних вимог до точності, якості поверхні, часу виготовлення та функціональних властивостей виробів. Актуальність роботи обумовлена запитом сучасної медицини на науково обґрунтовані технології виготовлення точних, якісних і безпечних анатомічних моделей, що виготовляються методами 3D-друку, а також потребою в адаптації адитивних технологій до клінічних та навчальних задач.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та дотримання принципів академічної доброчесності.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури (92 найменування) та 7 додатків. Загальний обсяг дисертації - 197 сторінок.

У вступі дисертації автором здійснено аргументований вибір теми та обґрунтовано її актуальність, сформульовано мету, окреслено об'єкт та предмет досліджень, сформульовані ключові пункти наукової новизни та практичного значення отриманих результатів. Також подано відомості щодо апробації матеріалів дисертаційної роботи.

У першому розділі дисертації обґрунтовано доцільність використання анатомічних моделей у хірургічній практиці, особливо в ортопедії, де важливими є точність відтворення індивідуальної анатомії та функціональність моделей. Детально проаналізовано сучасні адитивні технології, зосереджуючи увагу на методі пошарового наплавлення (FDM) як найбільш доступному та придатному для певних клінічних завдань. Розглянуто вимоги до якості анатомічних моделей залежно від клінічної ситуації – точність, шорсткість поверхні, терміни виготовлення, механічні властивості. Особливу увагу приділено проблемам, що виникають під час FDM: варіативність геометрії, поверхнева шорсткість, необхідність додаткової обробки. Також систематизовано існуючі методи постдрукерської обробки (механічної, термічної, хімічної), що застосовуються для покращення властивостей моделей та забезпечення відповідності клінічним вимогам. Окреслено перспективні напрямки досліджень, зокрема щодо вибору матеріалів та оптимізації технологічних параметрів FDM для підвищення якості анатомічних виробів.

У другому розділі описано методику визначення показників якості анатомічних моделей, включаючи розмірну точність, шорсткість, пористість та механічних властивостей. Також у розділі запропоновано використання ефективні схеми планування експериментів, що дозволило дослідити вплив ряду ключових параметрів процесу. Застосовано сучасні підходи до оптимізації, зокрема методи квадратичного програмування та еволюційні алгоритми. Розділ створює основу для подальших етапів дослідження, спрямованих на побудову регресійних моделей і формування рекомендацій для практичного застосування.

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень впливу параметрів процесу FDM-друку на показники якості різних термопластичних матеріалів. Побудовано регресійні математичні моделі, що описують залежності між параметрами друку (щільність заповнення, швидкість друку, товщина шару тощо) та точністю, шорсткістю поверхні, пористістю і тривалістю виготовлення. Окрему увагу приділено дослідженню впливу термічної обробки на механічні властивості поліаміду-6 (PA6, нейлону), зокрема міцність і пластичність, що дозволяє забезпечувати заданий рівень відповідно до експлуатаційних вимог до виробу.

У четвертому розділі представлено результати комплексної оптимізації параметрів FDM-друку для двох типових клінічних сценаріїв: екстреного (пріоритет – швидкість) та планового (пріоритет – точність) виготовлення анатомічних моделей. На основі побудованих регресійних моделей визначено оптимальні комбінації параметрів для кожного критерію оптимізації, які забезпечують відповідність встановленим вимогам до точності, шорсткості та часу друку. Проведено валідацію отриманих рекомендацій на прикладі виготовлення моделі хребця L4, що підтвердило ефективність розробленого підходу до адаптивного налаштування процесу FDM для клінічних потреб.

За своїм змістом дисертаційна робота Л. О. Тумарченко є завершеною науковою працею: всі поставлені завдання виконані, мета досягнута, висновки відповідають цілям дослідження. У тексті відсутні ознаки порушень академічної доброчесності.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукові результати дисертації Л. О. Тумарченко є добре обґрунтованими, логічно викладеними та підтвердженими системними експериментальними дослідженнями. Авторкою застосовано сучасні методи планування експерименту, математичного моделювання й статистичної обробки даних, що забезпечує достовірність отриманих результатів та їх відтворюваність у практичних умовах.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у встановленні закономірностей впливу параметрів процесу пошарового наплавлення FDM та термічної обробки на властивості анатомічних моделей, призначених для використання в ортопедичній хірургії. Зокрема:

1. Вперше визначено комплексний вплив ключових параметрів FDM на розмірну точність, шорсткість, пористість та тривалість виготовлення

моделей з термопластичних матеріалів: CoPET і PA6 (нейлон). Побудовані регресійні моделі впливу параметрів процесу FDM на шорсткість, тривалість виготовлення, точність, пористість для прогнозування з високою точністю значень показників якості.

2. Удосконалено уявлення про комплексний вплив параметрів FDM та термічної обробки на механічні властивості зразків з PA6 (нейлон). Встановлено, що збільшення температури (до 130 °C) та тривалості термічної обробки (до 90 хв.) сприяє отриманню максимальних значень міцності виробів, натомість відносно подовження має максимальне значення після термічної обробки за температури 110 °C тривалістю 60 хв з охолодженням з пічкою.

3. Отримано розвиток методичних підходів до вибору оптимальних параметрів FDM з урахуванням властивостей термопластичного матеріалу та особливостей клінічного застосування моделі. Сформовано науково обгрунтовані рекомендації щодо підбору матеріалів, режимів FDM та термічної обробки відповідно до завдань хірургічного планування та навчальних цілей.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи полягає у розробленні рекомендацій щодо вибору параметрів FDM для виготовлення анатомічних моделей з передбачуваною якістю, яка відповідає клінічним вимогам ортопедичної хірургії та навчального процесу.

Обгрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації Л. О. Тумарченко підтверджується результатами експериментальних досліджень, проведених із використанням сучасних методів вимірювання розмірної точності, шорсткості, пористості та часу виготовлення анатомічних моделей. Побудовані математичні моделі відображають стійкі залежності між параметрами процесу та якістю виробів, що підкріплюється статистичною обробкою даних. Отримані результати узгоджуються з науковими даними інших дослідників і мають практичне підтвердження у вигляді технологічних рекомендацій для клінічного використання.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана грамотною державною мовою з дотриманням мовних норм і використанням коректної технічної термінології, яка відповідає існуючим науковим уявленням. Виклад матеріалу відзначається логічною послідовністю, змістовною цілісністю та повнотою.

Дисертаційну роботу оформлено відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 4 статтях у наукових фахових виданнях, одне з яких індексується в наукометричній базі Scopus. Також результати дисертації були апробовані на всеукраїнській та міжнародній науково-технічних конференціях, міжнародних наукових конгресах. Таким

чином, наукові результати дисертаційної роботи повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувачки.

Зауваження до дисертаційної роботи.

Дисертаційні дослідження виконано на високому науково-технічному рівні. Принципових зауважень щодо змісту дисертації немає, але слід звернути увагу на наступне:

1. У п.1 наукової новизни вказано, що в роботі досліджено три матеріали, але в основному тексті роботи не дуже чітко зазначено які саме результати були отримані для акрилонітрилбутадієнстиролу (ABS+). Також відсутні технологічні рекомендації щодо параметрів процесу FDM та обґрунтування умов вибору цього матеріалу (п.4.3) для застосування залежно від клінічних випадків (пріоритетів та контексту застосування моделі).

2. При оптимізації параметрів виготовлення методом FDM критеріями слугували геометричні та поверхневі параметри, але практичне застосування анатомічних моделей у хірургічному тренуванні потребує аналізу їх поведінки під механічним навантаженням, особливо тих, які піддаються свердлінню, фіксації або імітації операційних втручань. В роботі відсутні дослідження, які б визначали вплив параметрів виготовлення на механічні властивості, це б дозволило виконати прогнозування поведінки матеріалу при навантаженнях за різними схемами, аналіз напружено-деформованого стану моделей з урахуванням щільності та схеми заповнення, орієнтування моделі при виготовленні тощо. Такі дослідження дозволили б більш коректно адаптувати процес FDM до клінічних вимог.

3. Автор роботи називає залежністю лінійну діаграму, яку побудовано на основі двох середніх значень (рис. 3.3, 3.7, 3.8, 3.9, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.20, 3.21, 3.25, 3.26). Такий підхід не гарантує достовірності узагальнень, оскільки між змінними може існувати більш складна (не лінійна) залежність, яку неможливо адекватно описати за допомогою двох точок. На рис. 3.7, 3.14, 3.15, 3.26, 3.31, 3.37 між собою з'єднані лінією на графіку значення для різних схем заповнення (прямолінійна, концентрична, крива Гілберта). В таких випадках слід надавати інформацію з використанням гістограм, оскільки порядок категорій не впливає на значення та не пов'язаний між собою.

Висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну й практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

У цілому вважаю, що дисертаційна робота Тумарченко Лариси Олександрівни на тему «Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення» є самостійним, цілісним і завершеним науковим дослідженням, виконаним на належному науковому рівні та не порушує принципів академічної доброчесності. Сукупність отриманих теоретичних та практичних результатів дозволяє розв'язати важливу науково-прикладну задачу у галузі знань 13 Механічна інженерія. За актуальністю, науковою новизною, рівнем

обґрунтованості результатів та практичною значущістю дослідження повністю відповідає вимогам п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44. Здобувачка Тумарченко Лариса Олександрівна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Офіційний опонент:

професор кафедри конструювання,
технічної естетики та дизайну
механіко-машинобудівного факультету
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»,
доктор технічних наук, старший дослідник



Ганна КОНОНЕНКО

Підпис Г.А. Кононенко затверджую:

Вчений секретар НТУ «Дніпровська політехніка»

к.п.н., доц.



Таїсія КАЛЮЖНА

М.П.

« 13 » серпня 2025 року

